



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE  
SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE  
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS  
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference  
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

## ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Własności magnetyczne i mechaniczne materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej wzmocnianych cząstkami magnetycznie twardymi Nd-Fe-B\*

L.A. Dobrzański, M. Drak

Zakład Technologii Procesów Materiałowych i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Poland

W pracy przedstawiono wyniki badań własności magnetycznych i mechanicznych materiałów kompozytowych magnetycznie twardych o osnowie polimerowej z cząstkami ze sproszkowanej szybko chłodzonej taśmy z dodatkami proszków metali

### 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój techniki i technologii stwarza konieczność zwiększania wymagań stawianych wobec materiałów stosowanych na magnesy twarde. Powinny one mieć nie tylko wysokie własności magnetyczne, ale także odpowiednie własności mechaniczne. Za zwiększeniem własności mechanicznych magnesów przemawiają także względy ekonomiczne. Materiały te pracują w wielu precyzyjnych i drogich urządzeniach, więc poprawa własności mechanicznych wiąże się ze zwiększeniem trwałości zarówno magnesów jak i urządzeń [1-3].

Obecnie uwaga skupia się na materiałach opartych na metalach ziem rzadkich i metalach przejściowych, które pozwalają na otrzymanie bardzo dobrych magnesów trwałych typu Sm-Co i Nd-Fe-B. Materiały te w zależności od sposobu ich wytwarzania (np.: spiekanie, formowanie na zimno lub na gorąco) cechują różne własności magnetyczne i mechaniczne.

Mniejsza podatność na korozję magnesów wiązanych materiałami polimerowymi oraz możliwość formowania dowolnych kształtów z dużą dokładnością, a także prostsza i tańsza technologia produkcji powodują, że znajdują one coraz szersze zastosowanie w technice [3, 5]. Materiały te mają jednak niskie własności mechaniczne, a podczas pracy magnesy narażone są na naprężenia mechaniczne, które mogą być przyczyną ich uszkodzenia. Konieczne jest opracowanie magnesów o odpowiednich własnościach mechanicznych. Metodą zwiększania własności mechanicznych materiałów kompozytowych jest wprowadzanie wzmocnień wewnętrznych, zewnętrznych lub mieszanych [6].

W celu zwiększenia własności mechanicznych magnesów proszek magnetycznie twardy Nd-Fe-B można mieszać z proszkami metali i ich stopów. Technologia ich wytwarzania jest taka jak w przypadku wytwarzania magnesów wiązanych, lecz dodatkowo uzyskuje się obniżenie kosztów materiałowych ze względu na niższą cenę dodatków [3,7].

---

\* Autorzy uczestniczą w realizacji projektu CEEPUS No PL-013/03-04 kierowanego przez Prof. L.A. Dobrzańskiego

Celem niniejszej pracy jest zbadanie własności magnetycznych i mechanicznych materiałów kompozytowych magnetycznie twardych Nd-Fe-B uzyskanych z proszku otrzymanego metodą szybkiego chłodzenia przez wprowadzenie dodatków proszków metali i ich stopów: żelaza, aluminium, odlewniczego stopu miedzi z cyną CuSn10 oraz stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2.

## 2. PRZEBIEG BADAŃ

Badania wykonano na próbkach materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej wzmocnianych cząstkami magnetycznie twardymi ze sproszkowanej szybko chłodzonej taśmy Nd-Fe-B z dodatkami metalowymi: żelazo, aluminium, odlewniczy stop miedzi z cyną CuSn10, stal wysokostopowa X2CrNiMo17-12-2 o udziale masowym 5, 10 i 15%. Jako osnowę zastosowano termoutwardzalną żywicę epoksydową (2,5 % masowo). W celu uzyskania poślizgu podczas prasowania i wyciągania próbki z matrycy stosowano stearynian cynku (0,2 % masowo). Materiały kompozytowe prasowano jednostronnie jednoosiowo w temperaturze pokojowej pod ciśnieniem 800 - 900 MPa, a następnie utwardzano w temperaturze 180°C przez 2 godziny.

Badania własności magnetycznych przeprowadzono na urządzeniu typu MCS przeznaczonym do badania magnesów trwałych w obwodzie magnetycznym ze szczeliną powietrzną. Urządzenie to umożliwia badanie próbek walcowych o małej smukłości. Metoda badania oparta jest na pomiarze, za pomocą hallotronu, indukcji magnetycznej  $B_0$  w szczelinie między biegunem elektromagnesu, a powierzchnią czołową próbki oraz na pomiarze natężenia zewnętrznego pola magnesującego  $H_0$  wytwarzanego przez elektromagnes. Podczas badania rejestrowano pętlę histerezy i wyznaczano remanencję  $B_r$ , koercję  $H_{cB}$ ,  $H_{cJ}$ , maksymalną gęstość energii  $(BH)_{max}$  oraz przenikalność rewersyjną  $\mu_{rev}$ .

Badania wytrzymałości na ściskanie materiałów kompozytowych przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON 1150. Badania twardości przeprowadzono metodą Brinella przy zastosowaniu kulki o średnicy 2,5mm i obciążenia 31,25N.

## 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki przeprowadzonych badań własności magnetycznych zamieszczono w tabelicy 1. Materiał kompozytowy bez dodatków charakteryzuje remanencja ( $B_r = 0,706$  T), koercja indukcji ( $H_{cB} = 448,5$  kA/m), koercja polaryzacji ( $H_{cJ} = 743,5$  kA/m) oraz maksymalna gęstość energii ( $BH_{max} = 82,45$  kJ/m<sup>3</sup>). W przypadku zastosowania magnetycznie miękkiego proszku żelaza obserwuje się niewielkie zmiany wartości remanencji. Proszki niemagnetycznie zmieniają remanencję w większym stopniu. Dodatek proszku aluminium powoduje największe zmiany, proszki stopu CuSn10 i stali wysokostopowej zmniejszają remanencję w mniejszym stopniu. Wszystkie proszki dodatków obniżają wartość koercji. Największe zmiany koercji obserwuje się dla proszku żelaza. Mniejsze zmiany występują dla proszku aluminium. Proszki odlewniczego stopu miedzi z cyną i stali wysokostopowej zmniejszają koercję w najmniejszym stopniu. Największe różnice maksymalnej gęstości energii  $BH_{max}$  obserwuje się dla proszku aluminium, mniejsze dla proszku żelaza, natomiast najmniejsze dla proszków odlewniczego stopu miedzi z cyną CuSn10 i stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2. Duże zmiany koercji powodują wzrost przenikalności rewersyjnej  $\mu_{rev}$  badanych materiałów kompozytowych z dodatkiem proszku magnetycznie miękkiego z wartości 1,19 dla materiału kompozytowego bez dodatków do wartości 1,35; 1,58 i 1,76 odpowiednio dla 5, 10 i 15% dodatku proszku żelaza.

Tablica 1.

Porównanie własności magnetycznych badanych materiałów kompozytowych

materiał dodatku	masowe stężenie dodatku [ % ]	remanencja Br [ T ]	koercja indukcji $H_{cB}$ [kA/m]	koercja polaryzacji $H_{cJ}$ [kA/m]	maksymalny iloczyn energii $(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	przenikalność rewersyjna $\mu_{rev}$
bez dodatku	0	0,724	448,5	743,5	84,65	1,19
żelazo	5	0,694	385,9	679,3	66,08	1,35
	10	0,690	349,8	611,4	62,57	1,58
	15	0,684	314,0	581,4	51,81	1,76
aluminium	5	0,615	401,9	709,6	59,52	1,19
	10	0,580	379,6	694,8	58,16	1,20
	15	0,527	349,6	685,6	46,70	1,16
odlewniczy stop miedzi z cyną CuSn10	5	0,688	428,8	691,9	76,29	1,23
	10	0,668	406,6	683,4	69,40	1,28
	15	0,634	388,3	675,8	62,71	1,28
stal wysokostopowa X2CrNiMo17-12-2	5	0,690	426,5	692,3	74,97	1,22
	10	0,662	402,1	684,7	68,20	1,21
	15	0,632	379,5	684,0	61,43	1,21

Wpływ rodzaju i udziału proszku dodatku na wytrzymałość na ściskanie i twardość materiałów kompozytowych przedstawiono w tablicy 2. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie materiału kompozytowego bez dodatku proszku metalowego wynosi 112 MPa. Wprowadzenie do materiałów kompozytowych proszków dodatków metalowych zwiększa wytrzymałość na ściskanie. Najlepszą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się materiały kompozytowe z dodatkiem proszku żelaza. Wprowadzenie 5% proszku żelaza zwiększa wytrzymałość na ściskanie do 118,4 MPa, 10 i 15% proszku dodatku odpowiednio do 130,6 i 136,2 MPa. Materiałem, który w najmniejszym stopniu poprawia wytrzymałość na ściskanie jest stal wysokostopowa X2CrNiMo17-12-2.

Tablica 2

Wpływ rodzaju i udziału dodatku na własności mechaniczne materiałów kompozytowych

materiał dodatku	masowe stężenie dodatku [ % ]	twardość HBW	wytrzymałość na ściskanie Rc [MPa]
bez dodatku	0	35,0	112,0
żelazo	5	36,6	118,4
	10	37,1	130,6
	15	37,7	136,2
aluminium	5	34,5	115,3
	10	33,3	124,1
	15	29,7	127,2
odlewniczy stop miedzi z cyną CuSn10	5	35,8	114,2
	10	37,1	122,1
	15	38,3	125,5
stal wysokostopowa X2CrNiMo17-12-2	5	36,2	114,2
	10	38,6	118,5
	15	39,8	120,7

Twardość materiału kompozytowego bez dodatku proszku metalowego wynosi 35 HBW. Proszek żelaza, stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2 i odlewniczego stopu miedzi z cyną CuSn10 poprawiają twardość materiałów kompozytowych. Najlepszą twardością charakteryzują się materiały kompozytowe z dodatkiem proszku stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2. Proszek stali o udziale 5% zwiększa twardość do 36,2 HBW, 10 i 15% proszku odpowiednio do 38,6 i 39,8 HBW. Dodatek proszku aluminium zmniejsza twardość materiałów kompozytowych. Zmiany są tym większe im większy jest udział proszku aluminium

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują na zróżnicowanie własności magnetycznych badanych materiałów kompozytowych w zależności od zastosowanego dodatku metali lub ich stopów. Własności te zależą zarówno od rodzaju jak i udziału proszku dodatku. Magnetycznie miękki proszek żelaza nie powoduje zmian remanencji, obniża maksymalną gęstość energii i wpływa w największym stopniu na koercję oraz zmienia wartość przenikalności rewersyjnej. Niemagnetyczne proszki nie zmieniają przenikalności rewersyjnej. Proszek aluminium zmniejsza w największym stopniu remanencję i maksymalną gęstość energii oraz obniża koercję. Proszki odlewniczego stopu miedzi z cyną CuSn10 i stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2 mają najmniejszy wpływ na zmniejszenie własności magnetycznych badanych materiałów kompozytowych.

Wprowadzenie proszków metalowych powoduje zwiększenie zarówno wytrzymałości na ściskanie jak i twardości otrzymanych magnesów. Największy wpływ na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie ma proszek żelaza. Pozostałe proszki dodatków także wpływają korzystnie na wytrzymałość na ściskanie otrzymanych materiałów kompozytowych. Proszki metalowe poprawiają twardość materiałów kompozytowych. Najkorzystniejszy wpływ ma proszek stali wysokostopowej X2CrNiMo17-12-2.

#### LITERATURA

1. Fiepke J.W.: Permanent magnet materials, ASM Handbook, Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 2, 1990, p. 782 – 803
2. Leonowicz M.: Nowoczesne materiały magnetycznie twarde. Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996
3. Ślusarek B.: Dielektromagnesy, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001
4. Yamashita F., Hashimoto S., Sasaki Y., Fukunaga H.: IEEE Transaction on Magnetics, 35 (5) (1999) 3304.
5. Missol W.: 14<sup>th</sup> International Scientific Conference Advanced Materials and Technologies. Gliwice – Zakopane, 1995, p. 313 – 316
6. Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000
7. Leonowicz M.: Przegląd Elektrotechniczny, 9 (2002) 261